# 論文 軸方向鉄筋が腐食した RC ディープビームのせん断耐荷機構に関す る実験的研究

## 田中 敦士\*1·三木 朋広\*2

要旨:本論文では、軸方向鉄筋をスパン全体ならびにスパン内で部分的に腐食させた RC ディープビームの せん断耐荷機構について実験的に検討して、特に腐食発生位置や腐食量が異なる場合にそれらの要因が RC デ ィープビームのせん断耐荷機構に与える影響を明らかにすることを目的とした。RC ディープビームを対象と した載荷試験において、載荷中のひび割れ進展を詳細に把握するために、画像解析により載荷時のはりの表 面ひずみを計測した。本研究によって、軸方向鉄筋を腐食させた RC ディープビームでは、腐食の位置、腐食 量により最大荷重、ならびに斜めひび割れのひび割れ性状が変化することを明らかにした。 キーワード:腐食、せん断、RC ディープビーム、斜めひび割れ、腐食ひび割れ、画像解析

# 1. はじめに

既設鉄筋コンクリート (RC)構造物の維持管理システムにおいて,合理的な維持管理を行うためには,劣化した RC構造物の残存性能,特に耐荷力や変形性能を適切に評価する必要がある。RC構造物の劣化要因のうち,鉄筋腐食についてみると,鉄筋が腐食することによって,鉄筋断面の減少,鉄筋とコンクリート間の付着性能の変化,さらに鉄筋が腐食することで生成される腐食生成物による膨張圧に伴うひび割れ(以下,腐食ひび割れ)が RC 部材の力学特性に影響する。特に,鉄筋腐食によって生じる腐食ひび割れは,鉄筋に沿うように発生し,荷重によって生じるひび割れに影響を与える。

また,RC部材のせん断耐荷力の把握が重要であるが, 鉄筋腐食が部分的に生じた RC はりのせん断耐荷力の評 価やせん断耐荷機構を明らかにするための知見の蓄積が 求められる。既往研究では、薛ら<sup>1)</sup>は a/d=1.5~4.0のス レンダービームを対象に電食試験、載荷試験を行い、耐 荷機構の検討を行った。その結果、せん断スパン比が大 きくなると, 軸引張鉄筋に腐食が発生しても端部を定着 点とするアーチ機構の影響が弱くなり、はり機構からア ーチ機構への移行が発生しにくくなることがわかった。 特に a/d=1.5 の場合, 軸引張鉄筋の腐食は耐荷機構に及 ぼす影響が少ないため、耐荷性状に変化が見られない結 果となった。また、Rizwan  $6^{2}$ は a/d=1.63 のディープビ ームを対象に電食試験,載荷試験を行い,耐荷機構の検 討を行った。その結果, 健全試験体では, はり機構及び アーチ機構でせん断力に抵抗するが、腐食試験体ではア ーチ機構のみでせん断力に抵抗することがわかった。し かし、腐食位置・腐食発生量をパラメータとした実験や 検討はされていない。

本研究では、軸方向鉄筋の一部もしくはスパン全体を

腐食させた RC はり,特に a/d = 1.4の RC ディープビー ムを対象とした載荷試験を行い,腐食位置,腐食発生量, 腐食ひび割れがひび割れの進展とせん断耐荷機構,破壊 モードに与える影響を実験的に検討することを目的とし た。

#### 2. 実験概要

## 2.1 供試体ならびに載荷試験の概要

試験体概要を図−1 に示す。使用した供試体は、断面 150mm×200mm、長さ770mmのRCディープビームであ る。このはりを対象として、軸方向鉄筋の腐食を促進さ せるため、図−2 のような電食試験を実施し、その後載



<sup>\*1</sup> 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (学生会員)

<sup>\*2</sup> 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

表-1 試験体シリーズ

試験体	腐食位置	片側の腐食 領域の幅 (mm)	圧縮 強度 (N/mm)	区平質減率 (%)
1.4-A1	せん断スパン中央と 載荷点の中間	100	31.2	3.3
1.4-B1	王側の止し転ったい	105	34.9	3.3
1.4-B2	回側のせん例スハン		42.7	6.8
1.4-B3	十人から又示		31.2	13.9
1.4-C1	両側のせん断スパン	205	31.2	9.6
1.4-C2	中央から試験体端	203	31.2	13.5
1.4-D1			34.9	8.6
1.4-D2	軸方向鉄筋全体	325	31.2	22.8
1.4-D3			42.7	28.1

荷試験を行った。実験パラメータは腐食領域,腐食位置, 腐食程度とした。試験体は全10体であり,1.4-N1は健全 試験体で,それ以外の試験体はそれぞれ表-1に示す範 囲の軸方向鉄筋を腐食させた。目標腐食量は1.4-A1,B1, B2,C1,D1は10%,1.4-B3,C2は15%,1.4-D2は20%, 1.4-D3は30%とし、質量減少率の最大値が目標腐食量と 同程度になるように電食試験を行った。電食試験では, 主鉄筋,3%濃度のNaCl水溶液を浸したスポンジ,ステ ンレス板,銅線を連結させて電気回路にして,目標腐食 量に達するまで通電した。このとき,試験体底面に接触 させるスポンジの幅で促進腐食させる位置や範囲を管理 し,腐食程度は電流量と通電時間で制御した。

載荷試験では,油圧式 2000kN 万能試験機を用い,単 純支持した RC はりの2 点集中載荷を行った。計測項目 は荷重,支点および RC はりスパン中央の変位とした。 載荷中は,ひび割れの目視観察を行い,さらに各荷重で デジタルカメラにより試験体表面を撮影して画像解析を 実施した。

載荷試験後,試験体から軸方向鉄筋を取り出し,目に 見える腐食生成物を取り除いた後,約 50mm 毎に分割し て長さと質量を計測し,目視によって腐食が確認できる 鉄筋片と腐食のない健全な鉄筋片の単位長さ当たりの質 量を用いて,鉄筋の質量減少率 C(%)を算出した。また, 区間平均質量減少率とは,**表-1** に示した腐食発生領域 幅における式(1)で求めた質量減少率の平均値である.

$$\mathbf{C} = \Delta w / w \times 100 \tag{1}$$

ここで、 $\Delta w$ :腐食した鉄筋と健全な鉄筋の単位長さ当た りの質量差 (g/mm)、w:腐食していない鉄筋の単位長さ 当たりの質量 (g/mm)

## 2.2 画像解析

本研究では,画像相関法を用いた画像解析<sup>3</sup>によって, 試験載荷中の供試体における表面ひずみ分布の計測を行った。画像相関法はパターン追跡法の一つであり,変形

表-2 載荷試験結果

試験体	P <sub>fcr</sub> (kN)	P <sub>dcr</sub> (kN)	$P_{max}$ (kN)	V <sub>c</sub> (kN)	$\frac{P_{max}}{V_c}$	破壊モード		
1.4-N1	50	137	204.5	187.7	1.09	せん断圧縮		
1.4-A1	80	159	248.9	202.3	1.23	せん断圧縮		
1.4-B1	95	130	302.8	231.4	1.30	せん断圧縮		
1.4-B2	90	135	271.1	202.3	1.34	定着部		
1.4-B3	111	145	282.9	187.7	1.51	せん断圧縮		
1.4-C1	93	115	180.6	187.7	0.96	せん断圧縮/ 定着部		
1.4-C2	101	130	251.9	187.7	1.34	せん断圧縮/ 定着部		
1.4-D1	125	139	240.5	202.3	1.19	せん断圧縮		
1.4 <b>-</b> D2	36	70	144.2	187.7	0.77	定着部/ 曲げ		
1.4-D3	50	80	95.4	231.4	0.41	曲げ		
ただし, P <sub>fer</sub> : 曲げひび割れ発生時の荷重								

P<sub>dcr</sub>: 斜めひび割れ発生時の荷重

後の画像から変形前の画像と類似したパターンを探索す る方法である。本研究では、変形前の基準画像において、 任意の点(1 画素)を中心とした正方形の画素領域をあ らかじめ設定し、それと変形後の画像において類似した 画素領域を探索することで、その移動量を変位として算 出した。このようにして得た一定領域内の格子点の変位 を9節点アイソパラメトリック要素の節点変位として、 画像解析対象の領域内のひずみ分布を求めた。この作業 を一定の荷重段階で実施することによって、載荷に伴う 平面的なコンクリートひずみを計測した。本研究で使用 した画像の解像度は72dpi,サブセット(計算領域)は50× 50ピクセルであり、対象範囲は高さ 200mm×横 310mm の破壊スパンとした。

## 実験結果と考察

#### 3.1 質量減少率

図-3 に各試験体における軸方向鉄筋の質量減少率分 布を示す。1.4-D2, 1.4-D3 ではスパン中央の右側と左側 で質量減少率に差がみられる一方, 1.4-D2, 1.4-D3 以外 の試験体では左右のスパンで同程度の質量減少量となっ た。また、質量減少率の最大値は、部分的腐食をさせた 試験体では 1.4-A1 は載荷点から 45mm の位置で 6%であ ったが、1.4-B1、B2、B3、C1、C2 ではせん断スパン中央 付近もしくは支点付近の位置で 6.5%~17%であった。ま た,全体腐食をさせた試験体では1.4-D1 はせん断スパン 中央付近で 10.6%であった。一方, 図-3 下図をみると 1.4-D2 は載荷点付近の位置で 32%, 1.4-D3 は載荷点直下 の位置で47%であり、軸方向鉄筋の質量減少率が局所化 していることがわかる。これは組立鉄筋において電流が 消費されているためと考えられる。このことから、載荷 点位置に組立鉄筋を配置した試験体において軸方向鉄筋 全体を腐食させた場合,腐食量が多くなればなるほど, 載荷点付近で鉄筋腐食が局所化することがわかる。以降 の考察では、軸方向鉄筋の質量減少率の最大値、区間平



均質量減少率を用いて、試験体の説明を行う。

## 3.2 載荷試験結果

各試験体の荷重-変位関係を図-4 に示す。また,載荷 試験結果ならびに a/d = 1.4 の RC ディープビームの実験 で得た最大荷重 Pmax とせん断耐荷力の算出値 Vc の比(以 下,せん断耐力比, Pmax/Vc)を表-2 に示す。せん断耐荷 力の算定値は,式(2) 4)を用いて算出した。

$$V_{c} = 0.24 f'_{c}^{2/3} (1 + p_{v}^{1/2}) (1 + 3.33 r/d) b_{w} d / \{1 + (a/d)^{2}\}$$
(2)

ここでf'c: コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>), pv: 引張 鉄筋比(%), a: せん断スパン(mm), d: 有効高さ(mm),





(a) 最大荷重前(292kN)
(b) 最大荷重後(277kN)
図-5 斜めひび割れの様子(1.4-B1)





(a) 最大荷重前(263kN)
(b) 最大荷重後(23kN)
図-6 斜めひび割れの様子(1.4-B2)

*b*<sub>w</sub>:ウェブ幅(mm), *r*:載荷板幅(mm)

まず,図-4の荷重-変位関係を見ると,挙動が各試 験体で異なることがわかる。1.4-D2,D3において,曲げ ひび割れから最大荷重に至る間で曲げひび割れが急激に 進展していく様子が確認できた。また,荷重最大値がせ ん断耐荷力の算定値を大きく下回ったことから,軸方向 鉄筋が局所的に32%,47%と腐食し,断面欠損が局所的 に進んだことにより,タイド・アーチ機構が形成される 前に破壊したと推察できる。また,健全試験体の1.4-N1 では荷重最大値がせん断耐力を1割程度上回っている。 一方,1.4-C1,D2,D3以外のすべての試験体で最大荷重 値がせん断耐荷力の算定値を2割~4割程度上回ってい る。このことから,健全なはりと比べて異なる耐荷機構 になったことが推察できる。

せん断スパン中央から支点にかけて軸方向鉄筋を部 分的に腐食させた 1.4-B1 と 1.4-B2 において, 区間平均 質量減少率がどちらも低い値であるのにも関わらず最大 荷重後の挙動が大きく異なる結果となった。図-7 ひび 割れ図 1.4-B1, B2 左側せん断スパン部分の斜めひび割れ のことである。ここで、図-5 に示す最大荷重後 277kN 時の状態をみると、1.4-B1 では最大荷重後に既存の斜め ひび割れが大きく進展・開口していなかった。他の試験 体において最大荷重後にひび割れの進展はあるが、開口 していないものはなかった。一方,図-6に示す最大荷 重後 23kN 時の状態をみると、1.4-B2 では最大荷重後に 腐食ひびわれや斜めひび割れが急激に進展し、開口に至 っていることがわかる。これらのことから、最大荷重後 にせん断スパン中央から載荷点に存在する斜めひび割れ が進展し、開口したことによって、最大荷重後の斜めひ び割れがひび割れ進展・開口に影響を与えたと推察でき る。

また,表-2に示す,せん断耐力比をみると,1.4-A1,



B1~B3, C2, D1 において *Pmax/Vc* は 1.0 を上回ってお り, 1.19~1.51 の値となった。また, 1.4-D1 に比べ, 1.4-D2, D3 は曲げひび割れ発生荷重が小さくなることが確 認できる。

以上のことから、せん断スパン中央から支点を腐食さ せた試験体は健全試験体と比較してせん断耐荷力が向上 したことがわかる。一方、最大質量減少率が32%以上で、 かつ軸方向鉄筋全体が腐食している試験体は健全試験体 と比較してせん断耐荷力が低下することがわかる。以下 の節では、これらの挙動について詳細に調べていく。

#### 3.3 ひび割れ性状ならびにひび割れ進展

図-7 に載荷試験終了後のひび割れ状況と斜めひび割 れ角度 θ を示す。本研究では、斜めひび割れ角度は、せ ん断スパン内に発生した斜めひび割れと軸方向鉄筋との 交点と、ひび割れ先端を結ぶ直線の軸方向に対する角度 として定義した。質量減少率と斜めひび割れ角度の結果 から、全体腐食をした D シリーズにおいて質量減少率が 大きくなると、斜めひび割れ角度が小さくなることがわ かる。また、斜めひび割れが進展し、載荷点付近のコン クリートが圧縮破壊することをせん断圧縮破壊、定着部 でひび割れが進展し、試験体端部で開口する破壊を定着 部破壊、曲げスパン内のひびわれが進展し、開口する破 壊を曲げ破壊とする。以下、各試験体の詳細なひび割れ 状況について考察をする。

### (1) N, A シリーズ

1.4-N1 では、荷重 137kN 付近で破壊スパンにおいて載 荷点と支点を結ぶような斜めひび割れが発生したが、破 壊に至ることはなく、荷重が上昇し続けた。最大荷重の 204.5kN 付近で斜めひび割れが開口し、最大荷重後の 175kN 付近で載荷点付近のコンクリートが圧縮破壊をし た。

1.4-A1 では、111kNから130kNにかけて支点と載荷点 を結ぶような斜めひび割れが発生したが、破壊に至るこ とはなく、荷重が上昇し続けた。230kNあたりで新しく 斜めひび割れが発生し、最終的にはこれが載荷点へ向か って進展し、せん断圧縮破壊を示した。

# (2) B シリーズ

1.4-B1では,破壊スパンにおいて先行して発生した斜めひび割れより角度の小さな斜めひび割れがさらに発生し,進展した。最終的にはこれが載荷点へ向かって進展し,せん断圧縮破壊を示した。

1.4-B2 では,破壊スパンで発生した斜めひび割れは開口に至らず,最終的には支点付近の腐食ひび割れが進展, 定着部破壊を示した。

1.4-B3 では、荷重 145kN 付近で破壊スパンにおいて斜 めひび割れが発生した。最終的にはこれが載荷点へ向か って進展し、せん断圧縮破壊を示した。

1.4-B1, B2, B3 を比較すると腐食ひび割れが試験体端 部まで進展している試験体とそうでない試験体において ひび割れ進展の様子,破壊モードが異なることがわかる。 定着部までひび割れが進展している試験体 1.4-B2 では 定着部破壊を示した。一方,定着部までひび割れが進展 していない試験体 1.4-B1, B3 ではせん断圧縮破壊を示し た。

(3) Cシリーズ

1.4-C1, C2 では、載荷前から腐食ひび割れが進展して おり、破壊スパン端部で開口していた。最終的にはせん 断圧縮破壊と定着部破壊が並行するような破壊形態を示 した。

1.4-C1, C2から区間平均質量減少率が10%程度でかつ, せん断スパン中央から試験体端部まで腐食を行った場合, せん断スパン中央付近から試験体端部までつながる腐食 ひび割れが発生し,腐食ひび割れから載荷点や試験体端 部にひび割れが進展し,破壊に至ることがわかる。

## (4) D シリーズ

1.4-D1 では、荷重 139kN 付近で破壊スパンにおいて斜 めひび割れが発生した。最終的にはこれが載荷点へ向か って進展し、せん断圧縮破壊を示した。

1.4-D2 では、荷重 70kN 付近で破壊スパンにおいて斜めひび割れが発生した。しかし、斜めひび割れは開口せず、最終的には定着部破壊と曲げ破壊が並行するような破壊形態を示した。

1.4-D3 では,載荷前から腐食ひび割れが進展しており, 試験体の両端で開口していた。最終的には曲げ破壊を示



した。

1.4-D1, D2, D3 を比較すると区間平均質量減少率が 10%程度の場合,短い腐食ひび割れがいくつも発生し, 最終的にはせん断圧縮破壊を示す。一方,区間平均質量 減少率が22.8%以上と比較的大きな場合,試験体側面全 体に長い腐食ひび割れが発生し,最終的には曲げ破壊を 示すことがわかる。

## (5) まとめ

以上のことから、1.4-B2、C1、C2、D2 のようにせん断 スパン中央付近から試験体端部にかけて腐食ひび割れが 存在する場合、腐食ひび割れが進展・開口し、破壊に至 ることがわかる。また、1.4-D2、D3 のように区間平均質 量減少率が 22.8%以上で、かつ腐食範囲が軸方向鉄筋全 体にわたる試験体では、載荷点直下から試験体端にまで 広がる腐食ひび割れからできた曲げひび割れが進展し、 破壊に至ることがわかる。これは、最大質量減少率が 32% 以上と比較的大きく、局所的に断面が欠損したことが要 因と推察される。

## 3.4 最大主ひずみ分布

破壊した側のせん断スパンを対象とした 1.4-B2, 1.4-D1, 1.4-D2 の最大主ひずみ分布を図-8, 図-9, 図-10 に示す。また,破壊した側のせん断スパンの定着部付近 を対象とした 1.4-D3 の最大主ひずみ分布をそれぞれ図 -11に示す。それぞれ 3000×1300 ピクセルの画像を用い て画像解析を実施した。画像解析の結果,腐食ひび割れ に沿って引張ひずみが集中していることを確認すること ができた。目視ではこのような状況を把握することでき なかった。

図-8 に示す,最大主ひずみ分布の右中央部分をみる と,1.4-B2 では,(1)斜めひび割れ発生時,(2)斜めひび割 れ発生~最大荷重時,(3)最大荷重時と荷重が大きくなる につれてせん断スパン中央~載荷点間において引張ひず みが集中していることが確認できる。また,(4)ピーク後 にかけて別の引張ひずみ集中領域が発生,進展している ことがわかる。実際に,ひび割れ状況でもこのようなひ び割れの状況を捉えた。

一方, 図-9 に示す, 最大主ひずみ分布の中央部分を みると、(1)曲げひび割れ発生時に引張ひずみ集中領域が 確認できる。これは、画像解析に用いた変形前の画像と 変形後の画像において輝度が異なったためと考えられ る。1.4-D1 では、(1)斜めひび割れ発生時に最大主ひずみ 分布の右下部分に曲げひび割れが発生していることが わかる。その後, (2)斜めひび割れ発生~最大荷重時, (3) 最大荷重時,(4)ピーク後と荷重が大きくなるにつれて, せん断スパン中央から載荷点間において引張ひずみが 集中していることが確認できる。さらに、(3)最大荷重時、 (4)ピーク後を比較すると、最大主ひずみ分布の中央部分 から右斜め上方向に向かって別の引張ひずみ集中領域 が進展していることがわかる。実際、ひび割れ状況でも このような斜めひび割れの状況を捉えることができた。 破壊時には、2番目に発生、進展した斜めひび割れの先 端部の載荷点付近で圧縮破壊が生じた。

また,図-10に示す,最大主ひずみ分布の右下部分 をみると,1.4-D2では(1)曲げひび割れ発生時,(2)曲げ ひび割れ発生~斜めひび割れ発生時,(3)斜めひび割れ 発生~最大荷重時と荷重が大きくなるにつれて,載荷前 から試験体全体に存在していた腐食ひび割れに引張ひず みが集中していることがわかる。

また,図-11に示す,最大主ひずみ分布の右下部 分,左上部分をみると,1.4-D3 では載荷前から定着部 に存在していたひび割れに引張ひずみが集中しているこ とがわかる。(1)曲げひび割れ発生時,(2) 斜めひび割



図-10 画像解析範囲と最大主ひずみ分布(1.4-D2)

れ発生時,(3)最大荷重時と荷重が大きくなるにつれ て,引張ひずみが集中し,2つの腐食ひび割れがそれぞ れ進展していることがわかる。

表-2のDシリーズにおいて最大荷重は最大質量減少 率を考慮した曲げ耐力算定値よりも下回った。また,曲 げひび割れ発生時の荷重と1.4-D1,D2,D3の画像解析 の比較から,軸方向鉄筋全体に腐食を有し,かつ区間平 均質量減少率が22.8%以上である場合,腐食ひび割れが 曲げひび割れの発生・進展に影響を与えることがわか る。その結果,曲げひび割れの発生・進展の様子が変わ り,破壊モードが曲げ破壊になると推察できる。

## 4. まとめ

本研究では、電食試験により軸方向鉄筋を部分的に腐 食させた a/d=1.4 の RC ディープビームに対して載荷試 験を実施し、デジタルカメラを用いて撮影した画像から 画像解析を行い、最大主ひずみ分布を求めることで腐食 ひび割れがせん断耐荷機構に与える影響について検討し た。以上の実験結果ならびに考察から得た結果を以下に 示す。

- (1) 部分的に腐食させた RC ディープビームにおいて区 間平均質量減少率が 3.3%~13.5%である場合,腐食の 位置,腐食量が,荷重最大値,せん断耐荷機構,特に 斜めひび割れのひび割れ進展に影響を与えることが わかった。
- (2) 部分的に腐食をさせた RC ディープビームにおいて



区間平均質量減少率が 6.8%~13.5%で, 腐食ひび割れ がせん断スパン中央から試験体端部の領域で腐食ひ び割れの発生範囲が広い場合, ディープビームに特 徴的なせん断圧縮破壊をする前に, 軸方向鉄筋の定 着部において破壊する。

(3) 全体腐食させた RC ディープビームにおいて区間平 均質量減少率が22.8%以上である場合,腐食ひび割れ, 腐食量が,荷重最大値と,特に曲げひび割れのひび割 れ進展に影響を与えることがわかった。また,腐食ひ び割れに沿って引張ひずみが集中し,耐荷機構が変 化することがわかった。

#### 謝辞

本研究の一部は, JSPS 科研費 15KK0208 の助成を受け たものである。

## 参考文献

- Xin XUE, 関博,広森紳太郎:鉄筋が腐食した RC はりのせん断耐荷挙動に関する研究,土木学会論文 集 E, Vol.65, No.2, pp.167-177, 2009.4
- Rizwan Azam, Khaled Soudki: Structural Performance of Shear-Critical RC Dep Beams with Corroded Longitudinal Steel Reinforcement, Cement and Concrete Composites, Vol.34(8), pp.946-957, 2012
- 3) 三木朋広,林 大輔:画像相関法による局所的圧縮 力を受けるコンクリートの非接触ひずみ計測,建設 工学研究所論文報告集,第 52 号,pp.53-60,2010.11
- 4) 土木学会:2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編]